https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.81647.1261
مقالهٔ پژوهشی-مطالعهٔ موردی

مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال بیست و یکم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۲، شمارهٔ پیاپی ۴۳

آسیب‌پذیری اقلیمی و راهبردهای پایداری منابع آب در حوضهٔ کارون شمالی

بیژن صابری (دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران)
bijan_sabery@yahoo.com
داریوش رحیمی (استاد هید رواقلیم، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، نویسنده مسئول)
rahimi@geo.ui.ac
جواد خوشحال دستجردی (دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران)
javadkhoshhal@yahoo.com

صص ۲۵۵ ـ ۲۲۹

چکیده

حوضه آبی کارون شمالی در تأمین پایدار منابع آب جنوب غرب و فلات مرکزی ایران مؤثر است. رخداد خشکسالی‌های حوضه به کاهش ۵۰٪ آبدهی و افت سطح ایستابی آبخوان‌ها منجر شده است. زیاد بودن ضریب تغییرات آبدهی حوضه (۶۳٪) بیانگر آسیب‌پذیری منابع آب است. برای تحلیل شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی (۲۰۲۰-۱۹۹۰) از روش تحلیل مؤلفه‌های مبنا و برای رتبه بندی عامل از شاخص مقدار ویژه استفاده شد. یافته‌های آماری نشان داد، مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در آسیب پذیری اقلیمی(CVI) حوضه کارون شمالی، تغییرپذیری دبی (W=1.987)، فراوانی خشک‌سالی (W=1.658)، آب کشاورزی (W=1.33) و کسری مخزن آبخوان (W=1.09) هستند. زیرحوضه های بهشت‌آباد، ونک و لردگان دارای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲٤ تاریخ تصویب: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

ضریب آسیب‌پذیری بحرانی و زیاد هستند و بازفت و کوهرنگ کمترین آسیب‌پذیری را دارند. برای آینده‌نگری حوضه از شرایط اقلیمی (۲۰۴۰–۲۰۲۰) و مبتنی بر تغییر اقلیم در سناریوهای SSp4.5,SSp 8.5 گزارش ششم و پیشران‌های منفی و مثبت برنامه‌های توسعه حوضه در افق ۱٤۲۰ استفاده شد. یافته‌ها نشان داد، با ادامه روند فعلی دما و رخداد خشک‌سالی‌ها و اجرای پروژه‌های انتقال آب و عمرانی در چارچوب پیشران‌های منفی، شدت شاخص آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود، اما با انتخاب راهبردهای مبتنی بر پیشران‌های مثبت سازگاری با تغییر اقلیم، اصلاح الگوی مصرف و تعدیل میزان آب قابل‌انتقال (از ۷۷۰ به ۲۱۲) شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی در چشم‌انداز (۲۰٤۰–۲۰۲۰) کاهش می‌یابد؛ تداوم وضع موجود به افزایش شاخص آسیب‌پذیری، تنش‌های اجتماعی و مهاجرت‌های اقلیمی منجر خواهد شد؛ ازاین‌رو بازنگری در راهبردهای بهره‌برداری، تعدیل برنامه‌های توسعه، انتخاب راهبردهای سازگاری تغییر اقلیم و اصلاح الگوی مصرف آب مبتنی بر توان اکولوژی به افزایش تاب‌آوری و پایداری منابع آب کمک می کند.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری اقلیمی، منابع آب، کارون شمالی، پیشران.

۱. مقدمه

محدودیت در تأمین آب شرب و کشاورزی، کاهش سطح ایستابی آبخوان‌ها و کاهش آب های سطحی از شاخص‌های آسیب‌پذیری اقلیم منابع آب است (IPCC[1]، ۲۰۲۲). یافته‌ها نشان می‌دهد که میزان آسیب‌پذیری منابع آب ناشی از تغییر اقلیم در عرض‌های میانی و مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به عرض‌های بالایی و مناطق مرطوب بیشتر است (IPCC، ۲۰۱۸). گرمایش جهانی و خشک‌سالی‌ها (۲۰۲۲ و ۲۰۲۱) در اروپا (مناطق معتدل نیمکره شمالی) به کاهش دبی و خشکیدگی رودخانه‌ها و از بین رفتن محصولات کشاورزی منجر شد (یورونیوز، ۲۰۲۲).

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

تغییر اقلیم موجب رخداد بیشتر بارش‌های سنگین (سینی ویرانت[1] و همکاران،۲۰۲۱، ص ۱۵۳٤)، ذوب سریع یخچال‌ها و کاهش کیفیت آب در بیشتر مناطق جهان شده است. ارزیابی اثرات افزایش ۲ درجه دما تا سال ۲۱۰۰ نشان می‌دهد که بین ۰/۹ تا ۳/۹ میلیارد نفر از جمعیت کره زمین با توجه به الگوهای منطقه‌ای تغییر اقلیم و سناریوهای اجتماعی و اقتصادی در معرض تنش آبی قرار می‌گیرند (کوترولیس[2] و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ۵۳). این تنش آبی محدودیت‌ها را برای دسترسی به منابع آب شیرین و تأمین آب برای شرب، کشاورزی و صنعت تشدید می‌کند (بیجل[3] و همکاران، ۲۰۱۸، ص. ۵۸۰۵؛ هاناساکس[4] و همکاران، ۲۰۱۸، ص. ۷۹۱؛ بورک[5] و همکاران، ۲۰۲۰، ص. ۳۲۷۰؛ مولر اشمید[6] و همکاران، ۲۰۲۱، ص. ۱۰۳۹).

به‌طورکلی در اثر تغییر اقلیم در جهان، حدود ۱۰ درصد از منابع آبی و همچنین بیش از ۳۵ درصد از تولیدات کشاورزی کاهش داشته است (کین[7] و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ٥١٦). داده‌های تاریخی ۲۰۰۰– ۱۹۷۱ منابع آب در مناطق شهری جهان نشان داد، ١٦ تا ۳۹ درصد شهرهای جهان در این دوره با کمبود آب روبه‌رو بودند. چنانچه نیازهای زیست‌محیطی اضافه شود، این نسبت به ۳٦ تا ٦۳ درصد می‌رسد. پیش‌بینی شرایط منابع آب تا سال ۲۰۵۰ نیز نشان می‌دهد که ٤٤۰ میلیون نفر از جمعیت شهری کشورهای توسعه‌یافته و به مقدار بسیار بیشتری در کشورهای درحال‌توسعه، با آسیب‌پذیری و چالش در تأمین منابع آب مواجه خواهند شد (فلورک[8] و همکاران، ۲۰۱۸، ص. ۵۳). ایران با بارش سالانه ۲٤۸ میلی‌متر و متوسط دمای ۱۸,٥ درجه سلسیوس اقلیمی خشک و نیمه‌خشک دارد. خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت، برداشت بیش از ظرفیت تجدیدشوندگی منابع آب موجب شده است که میزان

1. Seneviratne
2. Koutroulis
3. Bijl
4. Hanasaki
5. Burke
6. Müller Schmied
7. Qin
8. Flörke

شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی[1] (CVI) در بیشتر حوضه زیـاد باشـد. بهره‌بـرداری از منـابع آب زیرزمینی، انتقال آب بین‌حوضه‌ای، توسعه ناپایدار اقتصادی و اجتماعی و استقرار پروژه‌های با نیاز آبی زیاد در مناطقی با بارش کم و تمرکز جمعیت در کانون‌های خاص، این آسـیب‌پذیری را از سال ۲۰۰۸ تاکنون افزایش و تاب‌آوری حوضه‌های آبی را بـه‌شـدت کـاهش داده اسـت (فرمانبر و دلاور، ۱۳۹٦، ص. ٧٦).

حوضـه کـارون شـمالی بـه دلیـل دریافـت بـارش بـیش از میـانگین کشـور و شـرایط هیدرومورفیکی (قلل بیش از ۳۵۰۰، شـیب متوسـط بـیش از ۲۳ درصـد و مانـدگاری بـرف) همواره در برنامه‌های توسعه اقتصادی -اجتماعی ایران برای تأمین آب سایر حوضـه‌های آبـی مدنظر بوده است. بارگذاری زیاد، بی‌توجهی به نیازهای آبـی حوضـه (آب مصـرفی، حـق‌آبـه محیط‌زیست رودخانه)، خشک‌سالی‌های متوالی، افزایش دما به تنش‌هـای آبـی حوضـه منجـر شده است. بررسی آسیب‌پذیری منـابع آب حوضـه کـارون شـمالی و پیش‌بینـی بیلـان آبـی و شاخص آسیب‌پذیری منابع می‌تواند در تاب‌آوری و پایداری منابع آب آن مؤثر باشد.

۲. پیشینه تحقیق

ارزیابی آسیب‌پذیری تغییر اقلیم، گامی مهم برای شناسایی سازوکارهای مؤثر در مـدیریت منابع آب است. ساختار تداخلی سیستم های طبیعی نشان مـی دهـد کـه عوامـل محیطـی بـر یکدیگر تأثیرگذارند.منابع آب به‌عنوان نهـاده بسـیاری از فعالیت‌هـای اقتصـادی، اجتمـاعی و زیست‌محیطی تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار دارد.ارزیابی اثرات تغییر اقلیم ی تواند بـر افـزایش تاب آوری و ظرفیت سازگاری موثر باشد.

محمدخانی و جمالی (۱۳۹٤، ص. ٥٤) با استفاده از شاخص آسـیب‌پذیری اقلیمـی نشـان دادند که استان‌های همدان و البرز بیشترین میزان آسیب‌پذیری و استان‌های خوزستان و تهران به دلیل منابع آب غنی و نرخ زیاد باسوادی و وضعیت صنایع، کمترین آسیب‌پذیری را دارنـد. انصاری (۱۳۹۷، ص. ۲۳۷) با مطالعه اثر تغییر اقلیم در حوضه آبریز طشک بختگان نشـان داد، برای کاهش آسیب‌پذیری سیستم منابع آب در دوره آتی باید ضمن افزایش بهره‌وری اقتصادی

1. Climate Vulnerability Index

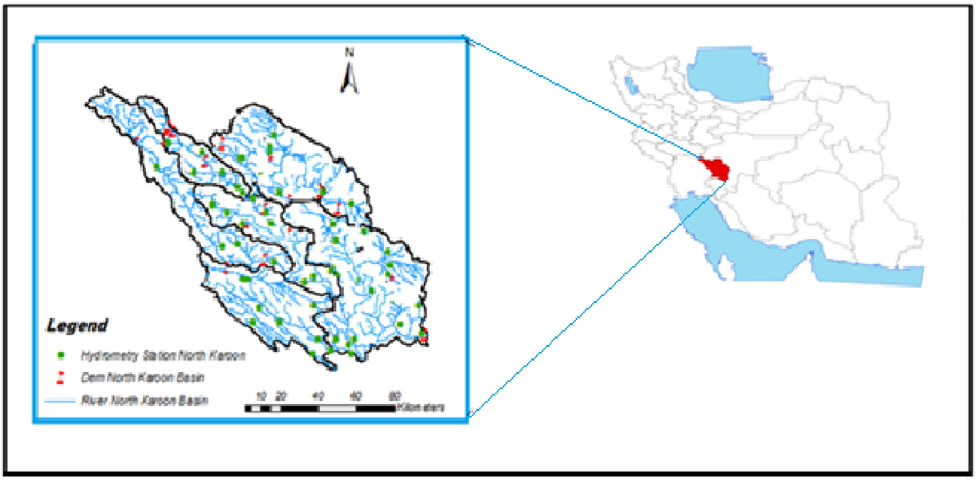
آب در بخش کشاورزی توسط افزایش راندمان آبیاری، فعالیت کشاورزی نیز کاهش یابد و به‌منظور جبران خسارت اقتصادی و اجتماعی، فعالیت در بخش خدمات و صنعت افزایش یابد. اقبال و محمدی (۱۳۹۹، ص. ۳۸) در پژوهشی میزان آسیب‌پذیری اقلیمی استان کردستان را مطالعه کردند و دریافتند که شهرهای دهگلان و سروآباد به ترتیب بیشترین و کمترین میزان آسیب‌پذیری را داشتند. از مطالعات خارجی می‌توان به پژوهش گویلامونت و سیمونت[1] (۲۰۱۵، ص. ٤۲) اشاره کرد. آن‌ها با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری کشورهای دنیا را ارزیابی کردند و مقدار عددی شاخص برای کشورهای درحال‌توسعه را ٤٦/٧٢ به دست آوردند. شلینگ[2] و همکاران (۲۰۲۰، ص. ۲) به بررسی میزان آسیب‌پذیری اقلیمی شمال آفریقا پرداختند. آن‌ها رشد جمعیت و کمبود منابع آب و بی‌ثباتی اجتماعی را بر میزان آسیب‌پذیری مؤثر دانستند؛ به‌طوری‌که الجزایر در رتبه اول قرار داشت. لی[3] و همکاران (۲۰۲۳، ص. ۱۷) با تحلیل سناریوهای تغییر اقلیم و شاخص حفاظت منابع آب میزان آسیب‌پذیر بودن اکوسیستم‌های طبیعی چین را بررسی کردند و تغییر کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی را از عوامل مؤثر دانستند و بیشترین آسیب‌پذیری را اکوسیستم علفزار در نظر گرفتند.

۳. روش‌شناسی تحقیق

حوضه کارون شمالی با زیر حوضه‌های بهشت‌آباد، کوهرنگ، کارون میانی، ونک، بازفت و لردگان، یکی از منابع تأمین آب جنوب غربی ایران (استان خوزستان) و فلات مرکزی ایران (اصفهان و یزد) است (شکل ۱). میزان بارش از ۹۸۰ میلی‌متر در حوضه کوهرنگ تا ۳۷۱ میلی‌متر در حوضه ونک نوسان مکانی دارد. خشک‌سالی‌های ۲۰۱۷–۲۰۰۸ به کاهش ۵۰ درصد دبی رودخانه، کسری مخزن، کاهش درآمد کشاورزان، افزایش فقر و مهاجرت جمعیت منجر شده است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان چهارمحال و بختیاری، ۱٤۰۰، ص. ۱۸۰).

---

1. Guillaumont & Simonet
2. Schilling
3. Li



شکل ۱. موقعیت حوضه کارون شمالی

مأخذ: مطالعات طرح احیای حوضه کارون شمالی، ۱۳۸۲

برای بررسی شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی از متغیرهای هیدرولوژی (آب‌های سطحی و زیرزمینی)، بارش و دما استفاده شد. با توجه به وجود شش زیرحوضه فرعی کارون شمالی از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های شهرکرد، کوهرنگ، بروجن، لردگان، ارمند، بهشت‌آباد و بازفت در دوره ی ۲۰۲۰–۱۹۹۰ استفاده شد. یکسان نبودن طول دوره آماری ارائه تحلیل سری زمانی یکسان را سخت می‌کرد، ولی با توجه به ارزش داده‌های مشاهداتی برای شناخت رفتار هر متغیر، هیچ داده‌ای حذف نشد. برای روندیابی متغیرها، داده‌ها متناسب با دوره آماری در دسترس بررسی تحلیل شدند. زیرحوضه کارون میانی به‌عنوان نقطه پایاب حوضه بود و ایستگاه ارمند به‌عنوان شاخص انتخاب شد. برای آنومالی‌ها آبدهی (۲۰۲۱–۱۹۵۸)، داده‌های بارش (۲۰۲۱–۱۹۷۰) و داده‌های آب‌های زیرزمینی (۲۰۲۱–۱۹۸۱) بررسی شدند. تحلیل تغییر اقلیم به‌وسیله داده‌های مشاهداتی (۲۰۲۱–۱۹۹۰) و دوره آینده (۲۰٤۰–۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم انجام شد. داده‌های مدل‌های CMIP6 از سایت www.climate change knowledge portal.org استخراج شده است.

روش تحقیق مبتنی بر تحلیل داده‌های تاریخی و آینده اقلیمی، هیدرولوژی و تحلیل اسنادی توسعه است. برای تشخیص روند متغیرهای هیدرو اقلیم (دبی وبارش) از آزمون

ناپارامتری پتیت[1] استفاده شد. پتیت این آزمون را در سال ۱۹۸۹ توسعه داد (رابطه ۱). این آزمون زمانی اهمیت دارد که هیچ فرضیه‌ای درمورد زمان تغییر موجود نباشد و نیازمند فرض نرمال بودن سری زمانی نیست و فرض صفر به‌صورت مستقل مقادیر مختلف سری زمانی را همگن می‌داند. درصورتی‌که شکستگی و ناپیوستگی در مقدار میانگین سری زمانی وجود داشته باشد، مطابق فرض یک این آزمون، سری زمانی ناهمگن است. این روش در یافتن ناهمگنی‌های نقاط میانی سری زمانی توانایی بیشتری دارد و از مهم‌ترین آزمون‌ها برای تشخیص شیفت ناگهانی در سری‌های زمانی است. برای تحلیل آنومالی داده‌ها از روش استاندارد و خط رگرسیون و برای تعیین خشک‌سالی از شاخص SPI برای دوره زمانی ۱۲ ماهه استفاده شد (رابطه ۲).

در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی تغییر اقلیم منطقه، از نتایج مدل‌های گردش عمومی جو در ششمین گزارش IPCC برای متغیرهای دما و بارش استفاده شد. تغییرات دما و بارش حوضه موردمطالعه در دوره پایه ۲۰۲۰ –۱۹۹۰ و دوره آتی ۲۰۲۰–۲۰۴۰ استخراج شد و بر پایه سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 سری CMIP6 تحلیل شد. پس از شبیه‌سازی وضعیت آسیب‌پذیری اقلیمی منطقه بررسی شد. تغییر در میزان بارش و دما در دوره آتی سبب تغییر در میزان رواناب شده و درنتیجه پتانسیل منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه نیز دستخوش تغییر خواهد شد. ارزیابی میزان آسیب‌پذیری اقلیمی حوضه به‌وسیله شاخص CVIانجام شد. برای نخستین بار، سولیوان و میغ (۲۰۰۵) این شاخص را معرفی کردند (رابطه ۳) و در گزارش‌های توسعه جهانی آب استفاده شده است. این شاخص طیف گسترده‌ای از عوامل اجتماعی، محیطی و فیزیکی را در مقیاس مکانی نشان می‌دهد. بدیهی است که شاخص‌ها در واحدها و مقیاس‌های مختلفی هستند، بنابراین هرکدام از این متغیرها باید ابتدا نرمال شوند تا قابلیت مقایسه پیدا کنند (جدول ۱). همچنین برای تعیین اوزان از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و شاخص بی‌بعد مقدار ویژه استفاده شد.

شایان ذکر است که در این مقاله شاخص CVI متناسب با اهداف آن و متغیرهای محلی کالیبره شده است. درواقع از متغیرهای اقلیمی، هیدرولوژی (دبی آب‌های سطحی) برای

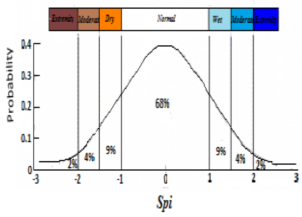
---

1. Pettit Test

شاخص در معرض خطر، از میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی، شرب و صنعت و سطح ایستابی برای شاخص حساسیت و از شاخص‌ها و سناریوهای توسعه (پیشران‌ها) برای سازگاری استفاده شده است.در این بخش از استان حجم آبدهی سالانه بین ٦ میلیارد مترمکعب در دوران ترسالی، ٤ میلیارد مترمکعب در شرایط نرمال و ۲,٥ میلیارد در شرایط خشک‌سالی در نوسان است. علاوه بر آن، به دلیل شیب و شرایط توپوگرافی استفاده استان از منابع آب سطحی محدود است و بیش از ۸۰ درصد از آب موردنیاز در بخش‌های مختلف اقتصادی از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود؛ بنابراین تغییرات دبی و سطح ایستابی برای شاخص حساسیت مناسب تشخیص داده شده است.

جدول ۱. روابط استفاده شده در پژوهش

مأخذ: IPCC، ۲۰۱۸

شاخص	رابطه	شرح
Pettit Test Equ.1	$K_T max\|U_{t,T}\|,$ $U_{t,T} = \sum_{i=1}^{t}\sum_{j=t+1}^{T} sgn\,(X_i - X_j)$ $p \simeq 2\exp\left(\frac{-6\,K_T^2}{T^3 + T^2}\right)$	نقطه تغییر سری‌ها در K_T احتمال معناداری K_T برای $p \leq 0.05$ (پولرت، ۲۰۱۸)
Normalize data Equ.2	SPI= $(P_i - \overline{P})/\delta_i,$	
CVI Equ.3	$CVI = \frac{rrR + r\,DF + rDis + Temp + G + Agri}{rg\ +\ rr\ +\ rdis\ +\ rdf +\ ragr}$	R: بارش، DF: فراوانی خشک‌سالی Dis: دبی، Temp: دما، G: آب زیرزمینی،Agri: آب کشاورزی، r: وزن متغیر

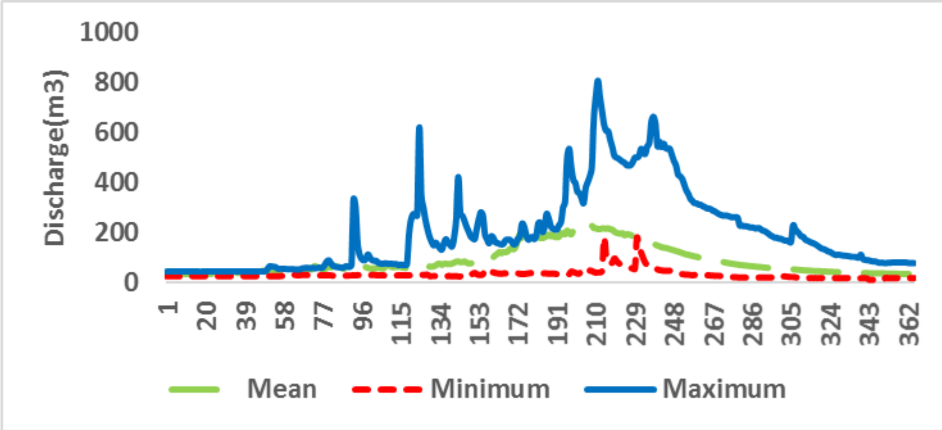
٤. بحث

حوضه آبی کارون شمالی با مساحت ١٤٠٥٣ کیلومترمربع، بارش سالانه ٦٥٠ میلی‌متر و شرایط هیدروژئولوژی دارای توان آبدهی ٤٠٠٠ میلیون مترمکعب در شرایط نرمال اقلیمی است. ظرفیت فیزیکی هیدرو اقلیمی حوضه باعث توجه برنامه‌ریزان آب (از ١٩٥١ تاکنون) برای تأمین کسری آب سایر حوضه‌ها (طرح انتقال آب کوهرنگ ١ (١٣٣٠)، کوهرنگ ٢ (١٣٦٦) و کوهرنگ ٣ (١٣٩٠)، بهشت‌آباد و رفسنجان (آینده) شده است. درمجموع حجم آب برنامه‌ریزی‌شده برای انتقال از حوضه کارون شمالی بیش از ١٦٠٠ میلیون مترمکعب است. بررسی برنامه‌های توسعه نشان می‌دهد که این پروژه‌ها بر مبنای شرایط نرمال هیدرواقلیمی انجام گرفته‌اند و موجب ایجاد باور خوش‌بینانه در برنامه‌ریزی منابع آب حوضه کارون با فرض وجود آب مازاد در حوضه شده‌اند، اما تغییرپذیری آب‌های سطحی، خشک‌سالی‌های ممتد، افزایش دما، افزایش نیازهای آبی و کسری آبخوان‌ها به ایجاد چالش‌های زیادی در منابع آب کارون شمالی منجر شده است.

٥. آسیب‌پذیری منابع آب در حوضه کارون شمالی

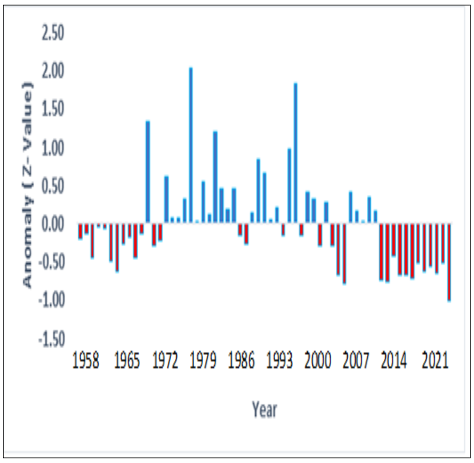
٥. ١. آب‌های سطحی

تغییرپذیری دبی رودخانه‌ها برای ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری آب‌های سطحی انتخاب شد. متوسط دبی روزانه ایستگاه ارمند در دوره ١٣٩٨–١٣٣٦، ٨٨/٥ متر بر ثانیه است. بیشترین دبی سالانه ٢٠٢ متر بر ثانیه (در سال ١٩٧٥) و کمترین دبی سالانه ٣٢ متر بر ثانیه (در سال ٢٠١٧) است. ضریب تغییر دبی سالانه ٦٣٪ است (شکل ٢). آنومالی آبدهی سالانه حوضه (٢٠٢١–١٩٥٨) نشان می‌دهد، رخداد منفی یعنی دوره‌های خشک‌سالی از (١٩٦٧–١٩٥٨) و (٢٠١٧–٢٠٠٨) بوده است (شکل ٣). لحاظ‌نکردن آنومالی‌های پریودیک (رخداد طبیعی) در برنامه‌های توسعه و مدیریت منابع آب به افزایش آسیب‌پذیری حوضه منجر شده است. روند تغییرات آبدهی با آزمون پتیت مشخص می‌کند که میزان دبی سالان از حدود ١٠١ مترمکعب بر ثانیه در دوره ١٩٩٧–١٩٥٨ به حدود ٦٥ مترمکعب در دوره (٢٠٢١–١٩٩٨) کاهش یافته است (شکل ٤).



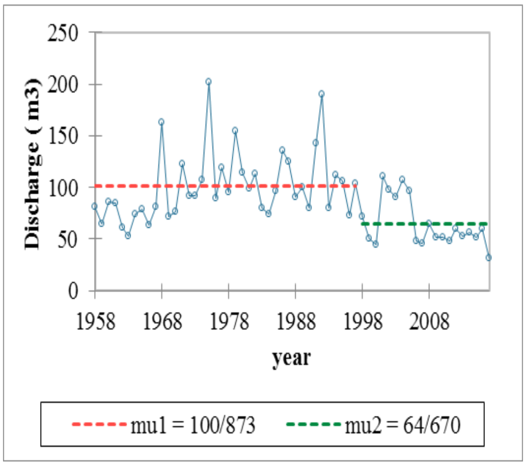
شکل ۲. هیدروگراف روزانه ایستگاه ارمند (میانگین سالانه)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۰



شکل ۳. آنومالی آبدهی سالانه در ایستگاه ارمند

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱



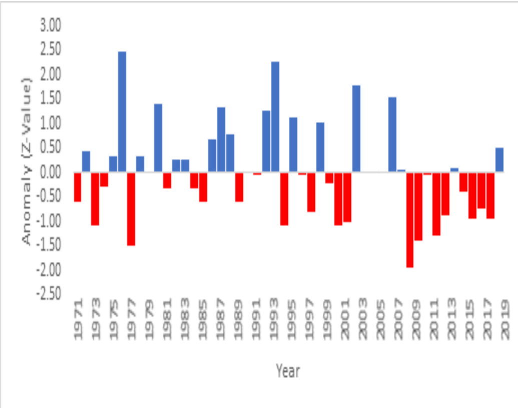
شکل ٤. تغییر در سری زمانی رواناب ایستگاه ارمند

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

٥. ۲. بارش

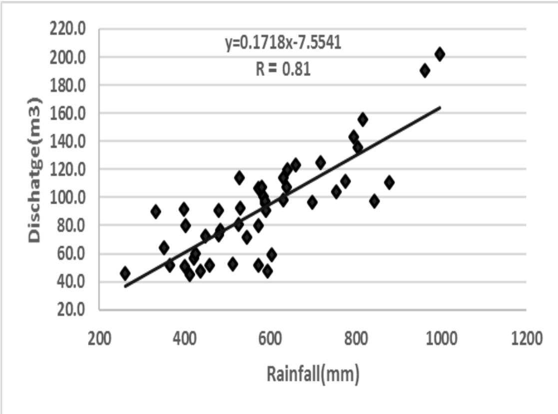
میانگین بارش سالانه حوضه کارون شمالی از ۳۷۱ میلی‌متر در زیرحوضه ونک تا ۹۸۰ میلی‌متر کوهرنگ نوسان دارد. بارش سالانه در کارون میانی (٥٨٦)، بازفت (٦٥٣)، لردگان (٦٠٢) و بهشت‌آباد (٥٨٢) میلی‌متر است (شکل ٥). بیشترین ضریب تغییر بارش ٦٧٪ در ونک و کمترین آن ۲۲/۷٪ در کوهرنگ است. این شاخص در بهشت‌آباد (۲۸/٦٪)، کارون

میانی (۲۹/۷٪)، بازفت و لردگان (۲۵٪) است. خشک‌سالی‌های متوالی از دیگر پارامترهای مؤثر در شاخص آسیب‌پذیری منابع آب است. درصد فراوانی‌خشکسالی‌ها در دوره (۲۰۲۱-۱۹۹۱) نشان داد که بهشت‌آباد ۵۵٪، کوهرنگ ۴۸٪، کارون میانی ۴۲٪، ونک ۳۵٪، بازفت ۳۲٪ و لردگان ۳۹٪ از سال‌ها بارش کمتر از نرمال بوده است. با توجه به تأثیرگذاری بارش‌ها بر دبی (R=0.81) و (R^2=65%) خشک‌سالی اخیرآسیب زیادی بر منابع آب حوضه کارون وارد کرده است (شکل ٦).



شکل ٥. آنومالی بارش‌های حوضه کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٤٠١



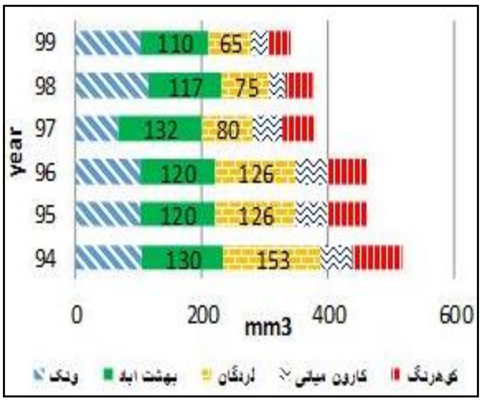
شکل ٦. رابطه بارش-دبی حوضه کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٤٠١

٥. ٣. آب‌های زیرزمینی

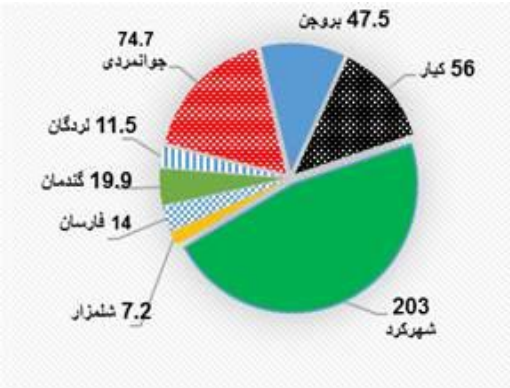
با توجه به وابستگی شدید حوضه به آب‌های زیرزمینی در تأمین نیازهای آبی، این شاخص مهم‌ترین شاخص حساسیت به آسیب‌پذیری منابع آب است. آب مصرفی حوضه کارون شمالی درمجموع ۹۲۱ میلیون مترمکعب است. از این مقدار، سهم آب مصرفی بخش کشاورزی (٨٦٪ معادل ۷۹۱/۵ میلیون مترمکعب)، صنعت (۲/٤٪ معادل ۳۸/۱ میلیون مترمکعب) و شرب (۹/۹٪ معادل ۹۱ میلیون مترمکعب) است که ٥١٦ میلیون مترمکعب آن از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود (شکل ۷). نتایج مطالعات بیلان آب آبخوان‌ها نشان می‌دهد، آبخوان‌های بروجن، سفید دشت و فرادنبه، خانمیرزا، شهرکرد و لردگان در وضعیت بحرانی و

ممنوعه و روند آبدهی آن‌ها کاهشی است (شکل ۸). آبخوان‌های حوضه به دلیل برداشت بیش از حد ظرفیت دارای کسری مخزن هستند. بیشترین کسری مخزن در بهشت‌آباد، لردگان و ونک قرار دارد (شکل ۹).



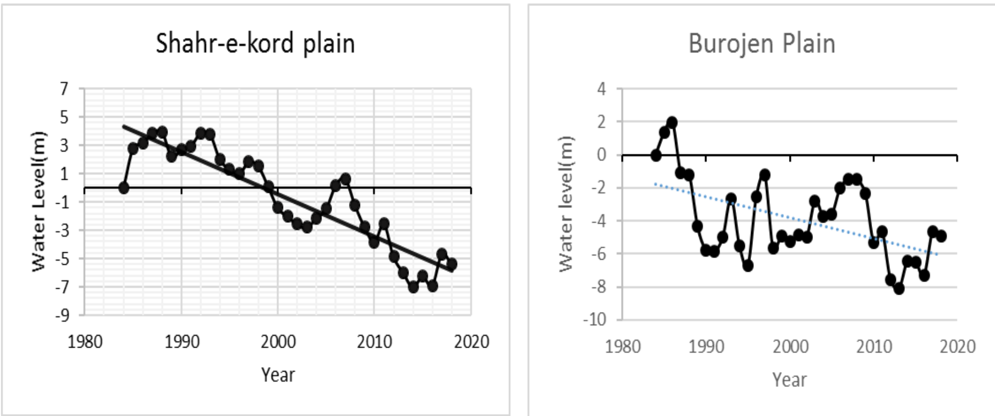
شکل ۷. میزان مصرف کشاورزی در زیرحوضه (MCM)

مأخذ: وزارت نیرو، ۱٤۰۰



شکل ۸. میزان کسری آبخوان‌های حوضه (MCM)

مأخذ: وزارت نیرو، ۱٤۰۰



شکل ۹. تغییر سطح ایست آبی دشت‌های حوضه کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

۵. ٤. بودجه آب (۲۰۲۰-۱۹۹۰)

بیلان آبی حوضه کارون شمالی براساس میزان آب در دسترس ۳۳۵۳/۸ میلیـون مترمکعـب آن آب‌هـای سـطحی ۲۸۳۷/۷ و آب‌هـای زیرزمینـی MCM ۵۱٦ اسـت. مصـرف آب در بخش‌های کشاورزی (۷۹۱/۵)، صنعت (۳۸/۱)، شرب (۹۱) میلیون مترمکعب و تأمین نیازهای محیط‌زیستی رودخانه (۱۱۱۱/۷) است. بیلان آبی لردگـان (K4) (۱۹/۲ میلیـون مترمکعـب) و بهشت‌آباد (K5) (۱٦/٦-) منفی و دارای کسری است (جدول ۲). لردگان به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و بهشت‌آباد علاوه بر فعالیت‌های کشاورزی، تمرکز جمعیت و فعالیت‌های صـنعتی بیشترین مصرف آب را دارند. این بیلان آبی در شرایط بدون انتقال آب بین‌حوضه (سـولگان-رفسنجان و بهشت‌آباد زاینده رود) است.

جدول ۲. بیلان آبی حوضه کارون شمالی (۲۰۲۰-۱۹۹۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۱

Sub-Basin *	Water Potential (MCM)			Water consumption(MCM)					Budget
	Surface water	Ground water	-Sum	Agri	Industrial	Drink	Environmental	Sum	
K1	1588.8	26.9	1615.6	23.4	0.0	4.7	656	684.1	931.5
K2	455.8	53.6	509.4	40.6	2.4	21.4	155	219.4	290
K3	91.2	40.5	131.7	55.4	1	4.8	30.8	92	39.7
K4	68	103.1	171.1	154.8	1.9	9.8	23.8	190.3	-19.2
K5	290.9	17.1	308.1	72.8	8.3	5.9	125	212	96.1
K6	343	274.8	617.9	444.5	24.5	44.4	121.1	634.5	-16.6
SUM	2837.7	516	3353.8	791.5	38.1	91	1111.7	2032.3	1321.5

*(K1: Bazoft, K2: Kohrang, K۳: Karoun miani, K۴: Lorddegan, K5: Vanak and K6: Behesht Abad)

٦. آسیب‌پذیری و تاب‌آوری اقلیمی منابع آب

شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی بیانگر آسیب‌پذیری، مدیریت و اثـر گـذاری تغییـر اقلـیم بـر منابع آب است. در این شاخص از سه فاکتوردر معرض خطر، حساسیت سیسـتم بـه خطـر و ظرفیت سازگاری و انطباق استفاده شده است. در این مطالعـه، منـابع آب بـه‌عنوان پدیـده در

معرض خطر در اثر متغیرهای مانند رخدادهای تغییر اقلیم و خشک‌سالی، میزان مصرف و تغییر سطح ایستابی و کسری مخزن به‌عنوان معیار حساسیت و راهبردهای توسعه در شرایط فعلی و آینده (مبتنی بر پیشران‌های منفی (شتاب دهنده خطر و حساسیت) و مثبت (تعدیل کننده خطر و حساسیت) به‌عنوان معیار سازگاری استفاده شده‌اند. برای شناخت آسیب‌پذیری و تاب‌آوری زیرحوضه‌ها از شاخص کالیبره‌شده و تعدیل‌شده براساس شرایط محلی آسیب‌پذیری اقلیمی (CVI[۱]) (سولیوان و بیامبا، ۲۰۰۵) استفاده شد. این شاخص در دوره بازه زمانی حال (۲۰۲۰–۱۹۹۰) و آینده (۲۰٤۰–۲۰۱۵) بررسی شد.

٦. ۱. شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی (۲۰۲۰–۱۹۹۰)

برای تعیین آسیب‌پذیری اقلیمی (۲۰۲۰–۱۹۹۰) از متغیر بارش، دبی، فراوانی خشک‌سالی، میزان آب مصرفی (کشاورزی، شرب و صنعت)، کسری مخزن دشت‌ها، شاخص آماری ضریب تغییر بارش و دبی، ضریب معناداری روند (بارش، دبی، دما حداقل و حداکثر) آزمون من–کندال در زیرحوضه ها انتخاب شدند. برای تعیین عامل‌های اصلی نیز از روش تحلیل مؤلفه‌های مبنا استفاده شد. یافته‌های تحلیل عاملی نشان داد که چهار عامل ضریب تغییر دبی، فراوانی خشک‌سالی، آب مصرفی بخش کشاورزی و تغییر سطح ایستابی به‌ترتیب بیشترین مقدار ویژه[۲] را دارند و ٩٦،٦٪ واریانس عوامل را تبیین می‌کنند (جدول ۳). مقادیر ویژه به دلیل بی‌بعدبودن برای وزن‌گذاری استفاده شده‌اند.

---

۱. Climate Vulnerability Index این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ است و بزرگ‌تر بودن آن نشانه آسیب پذیری بیشتر است.

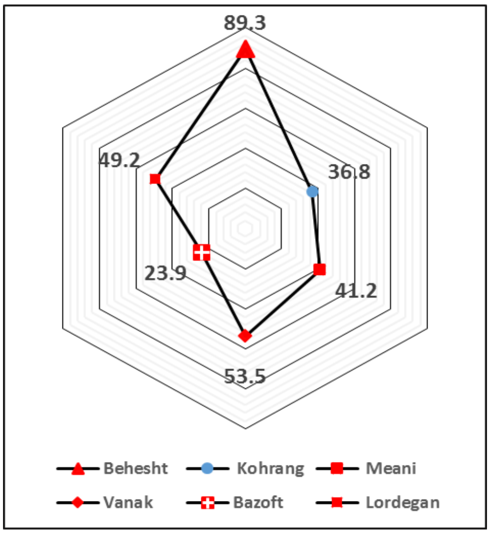
۲. Eigen values

جدول ۳. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و شاخص‌های درصد واریانس جزیی و تجمعی حوضه کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۰

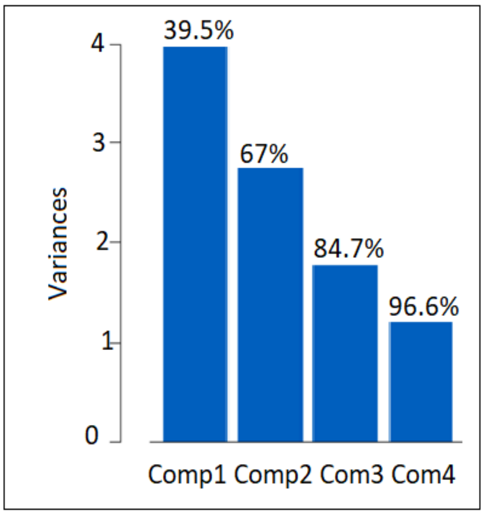
components:	Comp.1 (Dis-CV)	Comp.2 (D-F)	Comp.3 (Agri-W)	Comp.4 (WT)
Eigen-Value	۱,۹۸۷	۱,٦٥۸	۱,۳۳۲	۱,۰۹۱
Proportion STDV	٪۳۹,٥	٪۲۷,٥	٪۱۷,۷	٪۱۱,۹
Cumulative Proportion	٪۳۹,٥	٪٦۷	٪۸٤,۷	٪۹٦,٦

با توجه به مؤلفه‌های مبنا و واریانس محاسبه‌شده (شکل ۹)، یافته‌ها نشان داد که شاخص CVI در زیرحوضه بهشت‌آباد (۸۹/۳)، ونک (۵۳/۵)، لردگان (۴۹/۲)، کارون میانی (۴۱/۲)، کوهرنگ (۳٦/۸) و بازفت (۲۳/۹) است (شکل ۱۰ و ۱۱، جدول ٤). با کمک CVI رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها انجام شد و نقشه زیرحوضه بر مبنای شاخص CVI ترسیم شد. زیرحوضه بهشت‌آباد با جمعیتی بیش از ٦۵۰ هزار نفر، تمرکز بیشترین فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، زیرحوضه ونک به دلیل کم بودن میزان بارش سالانه و ضریب خشکی بیشتر و زیرحوضه لردگان به دلیل تمرکز جمعیت و فعالیت‌های کشاورزی در مقایسه با زیرحوضه‌های دیگر آسیب‌پذیرتر هستند (شکل ۱۲).



شکل ۱۰. مقادیر CVI در زیرحوضه‌های کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱



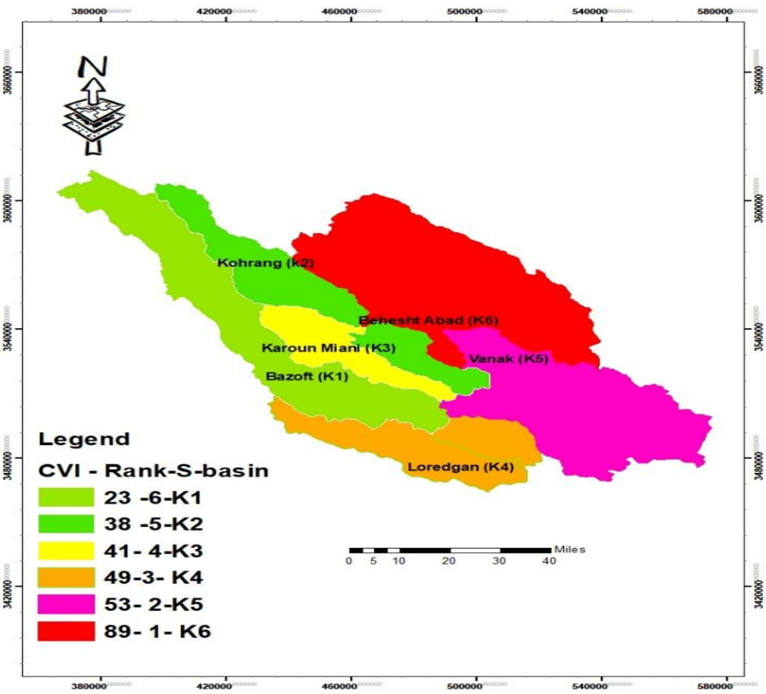
شکل ۱۱. مؤلفه مبنا و مقادیر واریانس در کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

جدول ٤. متغیرهای اصلی آسیب‌پذیری اقلیمی، شاخص CVI و رتبه زیرحوضه‌های کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

Basin	R (mm)	CV.R	DF	Dis M3	Temp (m)	Dis CV	WT (mcm)	Z-Ra	Z-dis	Agric (mcm)	CVI	Rank
Behesht	584	28.6	17	17.48	10.7	56.2	203	-1.55	-0.71	132	89.3	1
Kohrang	980	22.7	15	24.4	9.6	35.2	21.2	-1.89	-1.11	78	36.8	5
K-Meani	586.3	29.7	13	96.8	15.4	39	74.7	-1.78	-3.14	51	41.2	4
Vanak	371	67.2	11	2.68	10.8	74	19.9	-2.43	-3.89	102	53.5	2
Bazoft	602	25.1	10	68.6	15.1	37	10	-0.31	-1.06	32	23.9	6
Lordegan	573	25.4	12	25.4	15.7	30	11.5	-0.61	1.86	153	49.2	3



شکل ۱۲. رتبه بندی CVI در زیرحوضه های کارون شمالی (۲۰۲۰-۱۹۹۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

٦. ۲. آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب در آینده (۲۰٤۰-۲۰۱۵)

برآورد دقیق از آسیب‌پذیری منابع آب در آینده به دلیل نوسان‌های اقلیمی (افزایش تبخیر و تنش‌های آبی)، سیاست‌های توسعه اقتصادی و فناوری، الگوی کشت، بهره‌وری منابع آب، انتقال آب بین حوضه، حفاظت از منابع آب و مشارکت ذی‌نفعان مشکل است؛ بنابراین برای ارائه تصویری از آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب حوضه در آینده، از برآورد متغیرهای اقلیمی گزارش ششم (۲۰٤۰-۲۰۱۵) و برنامه‌های توسعه حوضه با پیشران‌های منفی و پیشران‌های مثبت در بخش منابع آب استفاده شد.

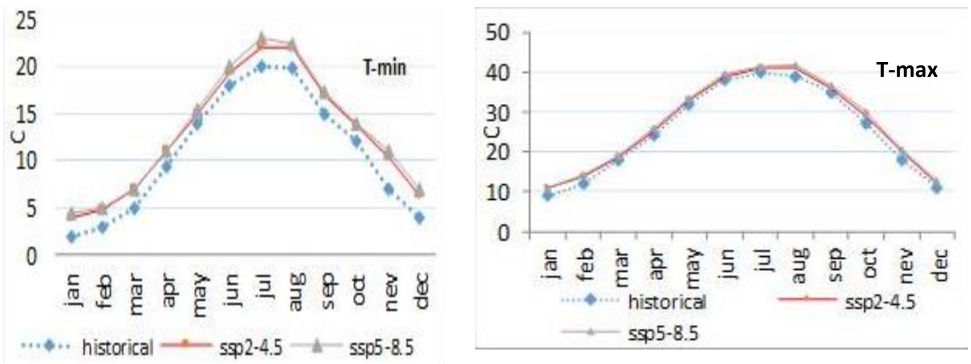
۷. شرایط اقلیمی آینده

تحلیل شرایط اقلیمی آینده (۲۰۴۰–۲۰۱۵) بر پایه سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 گزارش ششم (CMIP6) انجام شد. یافته‌ها نشان داد که دمای حداقل حوضه بین ۲ تا ۳ و دمای حداکثر ۱ تا ۲ درجه سلسیوس نسبت به دمای دوره پایه افزایش می‌یابد (شکل ۱۳). مقادیر معناداری ضریب من کندال بیانگر تداوم روند افزایش دمای حداقل و حداکثر سالانه است و مقدار بارش‌ها متناسب با نرم اقلیمی را تأیید می‌کند (جدول ۵). با توجه به اثرگذاری این متغیرهای اقلیمی بر منابع آب در آینده شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۵. مقادیر Z و P-value بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل آزمون من–کندال حوضه کارون شمالی (۲۰۴۰–۲۰۲۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۱

SSp5-8.5		SSP2-4.5		Variable
P-value	Z	P-value	Z	
0.2	0.83	0.02	1.89	بارش (mm)
0.002	5.73	0.003	4.47	دما حداکثر
0.001	5.75	0.001	5.8	دما حداقل



شکل ۱۳. دما حداقل و حداکثر حوضه ماهانه کارون شمالی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۱

۸. سیاست و برنامه‌های توسعه آینده حوضه

بررسی اسناد توسعه منطقه در حوضه کارون شمالی برای سال افق ۲۰٤۰ براساس پیشران‌های مثبت (فرایندهای بهبود منابع آب، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری) و منفی (افزایش آسیب‌پذیری و کاهش تاب‌آوری و فرایندهای تخریبی) تهیه شده است. عمده شاخص‌ها و اهداف تهیه‌شده به شرح زیر است:

۸. ۱. پیشران‌های منفی

شاخص آسیب‌پذیری با اجرای پیشران‌های زیر و شرایط تغییر اقلیم با شدت بیشتری روی خواهد داد. پیشران‌های منفی عبارت‌اند از:

–رخداد خشک‌سالی: کاهش آبدهی رودخانه و آب‌های سطحی و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی و فشار بیشتر بر آبخوان‌ها از پیامدهای خشک سالی‌ها است. خشک‌سالی‌ها موجب کاهش دبی رودخانه از ۹۸ مترمکعب (۱۹۵۸–۲۰۰۷) به ۵۱ مترمکعب (۲۰۱۷–۲۰۰۹) شد. در سال ۲۰۱۷ میزان دبی ۳۱ مترمکعب در ایستگاه ارمند شد؛

–تغییر اقلیم: داده‌های برآوردی دما (۲۰٤۰–۲۰۱۵) به افزایش تبخیر، نیاز آبی و تنش‌های شدید آبی منجر خواهد بود. این رخداد موجب افزایش آب نیاز آبی بخش کشاورزی (پرمصرف ترین بخش) و مؤلفه مهم در شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی خواهد شد.

–انتقال آب بین حوضه (طرح انتقال آب به زاینده رود (۵۷۰ میلیون مترمکعب) و (سولگان–رفسنجان ۲۰۰ میلیون مترمکعب).

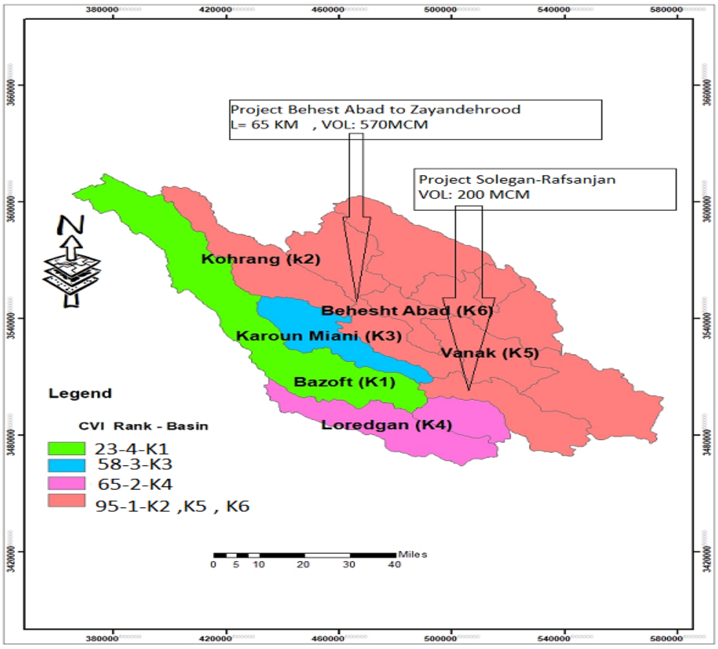
با تداوم روند افزایش دما، رخداد خشک‌سالی، اجرای پروژه‌های آبی مانند انتقال آب از زیرحوضه‌های بهشت‌آباد و کوهرنگ (۵۷۰ میلیون مترمکعب در سال) و ونک (۲۰۰ میلیون مترمکعب) و ادامه برداشت از منابع آب زیرزمینی، به دلیل تمرکز جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی در آن ،سه زیرحوضه با رقمی معادل MCM ٦٦۲ در بیلان منفی قرار می‌گیرد و بر شدت آسیب‌پذیری آن‌ها افزوده خواهد شد (جدول ٦).

جدول ٦. بیلان آبی زیرحوضه‌های کارون شمالی براساس پیشران‌های منفی و تغییر اقلیم (۲۰٤۰-۲۰۲۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

Sub-Basin	Water Potential (MCM)				مصرف (MCM)					Budget
	Surface	Ground water	Other	Sum	Agri	Industrial	Drink	Environmental	Sum	
K1	1588.8	26.9		1615.6	31.7	1	6.4	656	695.1	921.8
K2	455.8	53.6	-478	31.4	104.6	3.4	23.4	155	286.4	-244.2
K3	331.1	40.5	-28	343.6	153.4	7.5	10.7	413.3	585	241.4
K4	68	103.1	132	303.1	295.8	8.9	22.5	23.8	351.1	-19.4
K5	290.9	17.1	-292	16.1	123.6	7.4	9.1	125	265	-234.9
K6	103	274.8	-213	404.9	627.5	74.7	86.1	111.1	890.5	-426.5

بیلان آب در زیرحوضه‌های کوهرنگ، بهشت‌آباد و ونک (K2,K5,K6) با شاخص CVI=95 به دلیل اجرای پروژه‌های انتقال آب در (۲۰٤۰-۲۰۲۰) در وضعیت بحرانی و حوضه لردگان (K4) نیز به دلیل تمرکز و افزایش فعالیت‌های کشاورزی نسبت به ۲۰۲۰ شاخص آسیب‌پذیری آن (CVI=49 به CVI=65) افزایش خواهد یافت (شکل ١٤). درمجموع طبق پیشران‌های منفی، شرایط آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب افزایش یافته و تاب‌آوری آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱٤. رتبه بندی و CVI حوضه کارون شمالی در پیشران‌های منفی دوره (۲۰٤۰-۲۰۲۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

۸. ۲. پیشران‌های مثبت

افزایش پایداری منابع آب و تاب‌آوری زیرحوضه‌های بررسی‌شده ازجمله اهداف در توسعه پایدار منطقه محسوب می‌شود. برای تعدیل چالش‌ها و پایداری آینده منابع آب حوضه کارون شمالی، راهبرد سازگاری با تغییر اقلیم و اصلاح الگوی مصرف (پیشران مثبت) به‌جای راهبرد تأمین آب (پیشران منفی) پیشران‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

- توسعه اجرای پروژه‌های فناورانه مانند آبیاری تحت فشار، استفاده از آب خاکستری و توسعه شبکه فاضلاب؛
- مدیریت مصرف و برداشت آب‌های زیرزمینی و نظارت؛
- بازنگری در طرح‌های انتقال آب بین حوضه و تعدیل حجم آب قابل‌انتقال، حفاظت منابع آب آبخیزداری، آبخوانداری (تغذیه مصنوعی)؛
- بهینه‌سازی آب‌بهای بخش کشاورزی و ارزش‌گذاری آن؛

- ارائه و ترویج آموزش بهره‌برداران (گونه‌های مقاوم به خشکی، الگوی کشت)؛
- توسعه کشت دیم، احیای جنگل‌های مخروبه و مراتع با کمک بهره‌برداران محلی؛
- انتخاب الگوی کشت مناسب با توجه به سناریوهای تغییر اقلیم.

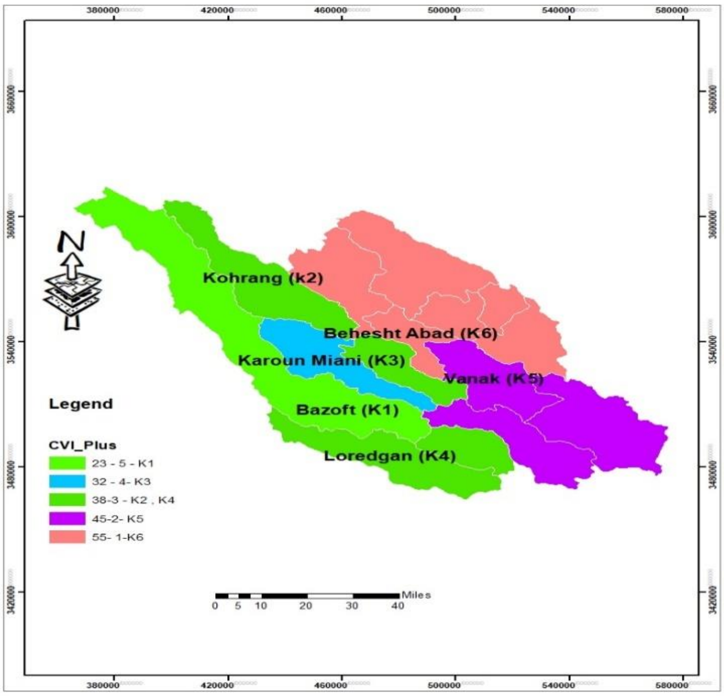
بنابراین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم و اصلاح الگوی مصرف در زیرحوضه‌های شش‌گانه (K1....K6) و بازنگری در پروژه‌ها و حجم انتقال آب در زیر حوضه‌های (K2,K5,K6) مفید خواهد بود. براساس سناریوهای پیشنهادی، حجم آب قابل‌انتقال بین حوضه (بهشت‌آباد و کوهرنگ به زاینده رود و فلات مرکزی) از ۵۷۰ میلیون مترمکعب به ۱۸۱ میلیون مترمکعب در سال و حوضه ونک (سولگان-رفسنجان) از ۲۰۰ میلیون مترمکعب به ۳۱ میلیون مترمکعب باید کاهش یابد (جدول ۷) (سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۹۸).

جدول ۷. میزان آب قابل‌برنامه‌ریزی کارون شمالی در سناریوهای پیشران مثبت (۲۰۴۰-۲۰۲۰)

مأخذ: مطالعات آمایش سرزمین استان چهارمحال و بختیاری، ۱۳۹۸

زیر حوضه	کوهرنگ				بهشت‌آباد				ونک			
طرح‌های توسعه	تونل ۳	زاینده رود	داخل	زیست‌محیطی	بن-بروجن	زاینده رود	داخلی	زیست‌محیطی	سبزکوه، لردگان بروجن	کرمان	داخلی	زیست‌محیطی
حجم (MCM)	۱۳۰	۱۰۷	٦٤	۱۵۵	٤۱	۷٤	۱۹۹	۱۱۱	۱۲۹	۳۱	٦۲	۱۲۵

سازگاری با تغییر اقلیم، آموزش ذی‌نفعان و ترویج تکنیک‌ها و اقدامات فناورانه مصرف آب در بخش کشاورزی و اجرای طرح‌های انتقال آب درون‌حوضه‌ای مانند کارون میانی به بهشت‌آباد، ونک به لردگان و اقدامات مبتنی بر سناریوی پیشران‌های مثبت می‌توان به افزایش تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب حوضه دست یافت (شکل ۱۵). با اجرای سناریوهای پیشران مثبت حوضه شاخص CVI در زیرحوضه‌ها تعدیل خواهد شد و می‌توان انتظار داشت منابع آب حوضه به پایداری نسبی خواهد رسید.



شکل ۱۵. رتبه‌بندی و CVI حوضه کارون شمالی در پیشران‌های مثبت دوره (۲۰۴۰–۲۰۲۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۱

۹. نتیجه‌گیری

تنش‌های آبی و محدودیت دسترسی به منابع آب از پیامدهای تغییر اقلیم است. توسعه اقتصادی و تمرکز جمعیت نیاز به آب را افزایش داده است. بهره‌برداری بیشتر از منابع آب سطحی و زیرزمینی همراه با گرمایش جهانی و خشک‌سالی‌های متوالی به افزایش آسیب‌پذیری اقلیمی منابع آب در جهان منجر شده است. ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در بیشتر مراکز جمعیتی با تنش آبی روبه‌رو است. جیره‌بندی آب شرب، درگیری‌های اجتماعی و مهاجرت از روستاها به حاشیه شهرها از جمله پیامدهای این پدیده است. حوضه کارون شمالی به دلیل پتانسیل منابع آب برای تأمین آب سایر مناطق از ۱۹۵۱ تاکنون مدنظر بوده است. اجرای طرح انتقال آب کوهرنگ ۱،۲،۳(۷۵۰ میلیون مترمکعب) و طرح پیشنهادی بهشت‌آباد (۵۸۰ میلیون مترمکعب) به زاینده‌رود و طرح سولگان–رفسنجان (ونک) (۲۰۰

میلیون مترمکعب)، احداث سدهای کارون ۳ و ٤ و پیشنهادی بازفت ۲ و ۲ و لیرو در همین راستا هستند.

یافته‌ها نشان داد که تغییر دبی، خشک‌سالی متوالی، کسری مخزن و افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی همراه با روند افزایش دما، مؤلفه‌های مؤثر در آسیب‌پذیری منابع آب حوضه کارون هستند. این آسیب‌پذیری با اجرای طرح‌های انتقال آب بهشت‌آباد و سولگان، بارگذاری بیشتر کشاورزی و شرب و تداوم روند افزایش دما (پیشران‌های منفی) شدت خواهد یافت، اما با اجرای راهبردهای مدیریت منابع آب مبتنی بر پیشران‌های مثبت (سازگاری با تغییر اقلیم، اصلاح الگوی مصرف بجای راهبرد تأمین آب) و تعدیل حجم آب قابل‌انتقال از ۷۷۰ به ۲۱۲ میلیون مترمکعب، حوضه کارون شمالی از آسیب‌پذیری بحرانی و شدید به آسیب‌پذیری متوسط و کم، ارتقا خواهد یافت؛ بنابراین تداوم وضع موجود به تداوم چالش‌ها و ایجاد بحران‌ها در زمینه تخریب برگشت‌ناپذیر منابع آب سطحی، فرونشست آبخوان‌ها وتنش های اجتماعی و مهاجرت‌های اقلیمی منجر خواهد شد؛ پس بازنگری در بهره‌برداری از منابع آب، تعدیل برنامه‌های توسعه، انتخاب راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم و اصلاح الگوی مصرف با توجه به توان اکولوژی رودخانه‌ها می‌تواند گام مؤثری در افزایش تاب‌آوری و پایداری منابع آب باشد.

کتابنامه

۱. انصاری، ث.، و دهبان، ح. (۱٤۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوزه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده براساس برونداد مدل‌های CMIP6. *مجله پژوهش آب ایران*، ١٦(١)، ١١-٢٤.

۲. انصاری، ث.، و مساح بوانی، ع. ر. (۱۳۹۷). ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم براساس نشانگرهای اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و امنیت آبی. *تحقیقات منابع آب ایران*، *١٤*(٥)، ۲۳۷-۲۵۳.

۳. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی چهار محال و بختیاری. (۱٤۰۰). *سند ملی آمایش استانی*. ۱۷۲-۱۹۵.

٤. صالح، ا.، و صالح‌نیا، ن. (۱٤۰۱). بررسی نقش تنوع معیشتی در تاب‌آوری و سطح رفاه جامعه روستایی در مواجهه با تغییر اقلیم. *مجله آب و توسعه پایدار*، ۹(۱)، ۷۵-۸٤.

۵. فرمانبر، ز.، و دلاور، م. (۱۳۹٦). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های منابع آب و کشاورزی در چارچوب ارزیابی منطقه‌ای. *تحقیقات منابع آب ایران*، *۱۳*(٤)، ۷۵–۸۸.
٦. محمدی، پ.، ملکیان، ا.، قربانی، م.، و نظری سامانی، ع. ا. (۱۳۹۸). بررسی ارتباط بین وضعیت آسیب‌پذیری جوامع و تغییرات آب و هوایی در استان کرمانشاه. *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*، *۹*(۳۲)، ٤۷–۳۳.
۷. وحدانی، اقبال، محمدی، حسین، و اسدیان، فریده. (۱۳۹۹). پهنه بندی شاخص آسیب‌پذیری ساختاری ناشی از تغییر اقلیم (مطالعه موردی استان کردستان). *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۲(۱)، ۳۸–٤۸.

8. Berrang-Ford, L., Siders, A. R., Lesnikowski, A., Fischer, A. P., Callaghan, M. W., Haddaway, N. R., ... & Abu, T. Z. (2021). A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, *11*(11), 989-1000.
9. Bijl, D. L., Beimans, H., Bogaart, P. W., Dekker S. C., Doelman, J. C., Stehfest, E., & van Vuuren, D. P. (2018). A global analysis of future water deficit based on different allocation mechanisms. *Water Resources Research*, *54*(8), 5803–5824.
10. Burek, P., Satoh, Y., Kahil, T., Tang, T., Greve, P., Smilovic, M., ..., & Wada, Y. (2020). Development of the Community Water Model (CWatM v1. 04)–a high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geoscientific Model Development*, *13*(7), 3267-3298
11. Burke, E. J., Zhang, Y., & and Krinner, G. (2020). Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change. *Cryosphere*, *14*(9), 3155–3174.
12. Das, S., & Banerjee, S. (2021). Investigation of changes in seasonal streamflow and sediment load in the Subarnarekha-Burhabalang basins using Mann-Kendall and Pettitt tests. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(11), 1-14.
13. Douville H., Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., & Jones, R. G. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. *Contribution of working group14 I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change; technical summary*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
14. Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M.,..., & Zolina, O. (2021). Water cycle changes. *In Climate change 2021: The physical science basis*. *Contribution of working group I to the sixth assessment*

report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

15. Flörke, M., Schneider, C., & McDonald, R. I. (2018). Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nature Sustainability*, *1*(1), 51–58.
16. Gadedjisso-Tossou, A., Adjegan, K. I., & Kablan, A. K. M. (2021). Rainfall and temperature trend analysis by Mann–Kendall test and significance for rainfed cereal yields in Northern Togo. *Sci*, *3*(1), 17.
17. Guillaumont, P., & Simonet, C. (2011). *Designing an index of structural vulnerability to climate change*. Ferdi Working Paper. 40-53. Retrieved from https://ferdi.fr/dl/df-wGxz7S3WC8RfZ82UJVCCwjzw/ferdi-b18-designing-an-index-of-physical-vulnerability-to-climate-change.pdf
18. Hanasaki, N., S. Yoshikawa, Y. P., & Kanae, S. (2018). A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(1), 789–817.
19. Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., & Kanae, S. (2018). A quantitative investigation of the thresholds for two conventional water scarcity indicators using a state-of-the-art global hydrological model with human activities. *Water Resources Research*, *54*(10), 8279-8294.
20. https://www.parsi.euronews.com/
21. Koutroulis, A. G., Papadimitriou, L. V., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., Warren, R., & Betts, R. A. (2019). Global water availability under high-end climate change: a vulnerability based assessment. *Global and Planetary Chang*, *175*, 52–63.
22. Li, Y., Kong, M., Zang, C., & Deng, J. (2023). Spatial and temporal evolution and driving mechanisms of water conservation amount of major ecosystems in typical watersheds in subtropical China. *Forests*, *14*(1), 2-18.
23. Müller Schmied, H., Caceres, D., Eisner S., Florke M., Herbert, C., Neimann, Ch., & Doll, P. (2021). The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: Model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, *14*(2), 1037-1079.
24. Müller, H., Schmied, P. Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., …, & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, *11*(3), 226-233.
25. Qin, Y., Mueller, N. D., Siebert, S., Jackson, R. B., AghaKouchak, A., Zimmerman, J. B., & Davis, S. J. (2019). Flexibility and intensity of global water use. *Nature Sustainability*, *2*(6), 515–523.
26. Qin, Z., Fu, H., & Chen, X. (2019). A study on altered granite meso-damage mechanisms due to water invasion-water loss cycles. *Environmental Earth Sciences*, *78*(14), 1-10

27. Schilling, J., Hertig, E., Tramblay, Y., & Scheffran, J. (2020). Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Regional Environmental Change*, *20*, 1-12
28. Searchinger, T., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., & Klirs, C. (2019). *Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050*. Word Resources.
29. Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A…, & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. In *Climate change 2021: The physical science basis*. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
30. Sullivan, C., & Byambaa. E. (2013). *The Climate Vulnerability Index (CVI) and an illustration of its application to Mongolia*. UNECE Climate Adaptation Workshop, Geneva.
31. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Special Report Global Warming of 1.5°C. October 2018*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
32. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Working Group Report AR6 Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/
33. The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. In *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.